

碳达峰视角下中国碳排放权行业路径分解研究

廖志高^{1,2*#}, 方文凯¹, 刘 攀¹

¹广西科技大学经济与管理学院, 广西 柳州

²广西工业高质量发展研究中心(广西科技大学), 广西 柳州

收稿日期: 2022年8月31日; 录用日期: 2022年11月14日; 发布日期: 2022年11月21日

摘要

以“碳达峰”为背景下研究中国碳排放权在各行业的路径分解研究, 寻找全国碳排放权按照各行业分配时的减排措施。首先, 借助灰色关联分析方法对全国碳排放权按门类分八种能源排放量下工业、建筑业、交通运输业、零售餐饮业以及农林牧渔水利业等各行业相关影响因素关联度进行分析, 得出工业和建筑业与全国碳排放总量关联度最高。其次, 利用GM(1,1)模型对全国的碳排放总量以及各行业分别进行预测, 结果显示各行业在维持当下政策时, 全国的碳排放总量将还会以0.48%的速率持续增长并预测出在2030年时碳排放总量为9786.46百万吨。最后, 根据各行业的公平性、效率性、潜力性以及关联性原则按照熵值法对各行业进行路径分解研究, 从而得出分配到各行业的碳减排量与预测出各行业碳排放量的初始空间余额值, 为生态环境部制定各行业的配额分配方案时提供政策建议, 继而扩大碳市场覆盖行业范围, 为全国实现双碳目标提供理论支持。

关键词

碳达峰, 行业碳排放权, 灰色关联分析, GM(1,1)模型, 熵值法

Research on Path Decomposition of China's Carbon Emission Rights Industry from the Perspective of Peak Carbon Dioxide Emissions

Zhigao Liao^{1,2*#}, Wenkai Fang¹, Pan Liu¹

¹School of Economics and Management, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou Guangxi

²Guangxi Industrial High Quality Development Research Center (Guangxi University of Science and Technology), Liuzhou Guangxi

Received: Aug. 31st, 2022; accepted: Nov. 14th, 2022; published: Nov. 21st, 2022

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

Under the background of “peak carbon dioxide emissions”, this paper studies the path decomposition of China’s carbon emission rights in various industries, and seeks the emission reduction measures when the national carbon emission rights are distributed according to various industries. Firstly, by using the grey correlation analysis method, this paper analyzes the correlation degree of related influencing factors in industries such as industry, construction, transportation, retail and catering, agriculture, forestry, animal husbandry, fishery, water conservancy, etc., in which the national carbon emission rights are divided into eight kinds of energy emissions, and concludes that the correlation degree between industry and construction and the national carbon emission is the highest. Secondly, the GM(1,1) model is used to forecast the total carbon emissions of the whole country and the industries. The results show that the total carbon emissions of the whole country will continue to increase at a rate of 0.48% when the current policies of all industries are maintained, and it is predicted that the total carbon emissions will be 9786.46 million tons in 2030. Finally, according to the principles of fairness, efficiency, potential and relevance of each industry, the path decomposition of each industry is studied according to entropy method, so as to obtain the carbon emission reduction amount allocated to each industry and the initial space balance value of the carbon emission amount predicted by each industry, which will provide policy suggestions for the Ministry of Ecology and Environment when formulating quota allocation schemes for each industry, and then expand the carbon market to cover the industry scope, and provide theoretical support for realizing the “double-carbon” goal in China.

Keywords

Peak Carbon Dioxide Emissions, Industry Carbon Emission Right, Grey Relational Analysis, GM(1,1) Model, Entropy Method

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自改革开放以来，我国的经济水平不断得到提升，经济发展趋势也从高速增长阶段转化为高质量发展阶段，党和国家领导人对生态环境也越来越重视，强调“绿水青山就是金山银山”的发展理念。而二氧化碳的过度排放将直接导致温室效应的产生，从而影响到我国可持续发展理念，根据我国统计局数据显示早在 2006 年我国碳排放总量就已居世界首位，高碳排放环境问题已成为影响到我国高质量发展所要面临解决的严峻问题。

环境污染问题已不再是某个国家单独要面临解决的问题，而是需要全球各国齐心协力共同攻克的难题。早在 2015 年时各国便达成了《巴黎协定》，这是应对气候变化史上具有里程碑意义的协议，对各国应对全球气候变化具有指导意义。为履行《巴黎协定》的承诺，我国在 2020 年 9 月也宣布了长期碳达峰碳中和的目标，既要在 2030 年达到碳达峰，并在 2060 年达到碳中和，并着手建立全国碳排放交易市场以及各种配套制度[1]。这表示在瞬息万变的全球环境背景下，全球最大的发展中国家将在今后的发展中充分考虑到环境的影响因素，这将会在应对气候变化中发挥巨大力量，为全球气候变化做出显著贡献，造福子孙后代。

基于此，深入分析研究我国经济如何在低碳环境下实现高质量发展问题，我国碳排放总量在排放过程中如何协调与经济发展要求相一致，如何制衡各行业在发展过程中碳排放权分配以及制定各行业的精准节能减排措施，为有关部门制定具体措施时提供理论支撑，实现我国经济的可持续发展以及早日实现碳达峰碳中和具有重要的研究意义，已成为众多研究学者研究的热点重点问题。

2. 文献综述

研究碳排放权分配已成为国内外研究碳排放课题的主流趋势，随着研究的不断深入，考虑到的分配原则也逐渐更加全面。在早期的研究中，主要侧重于碳减排的国际对比以及碳排放的影响因素上，通过借鉴国外的减排措施来指导我国的碳减排工作，分析出我国碳排放的影响因素，得出经济的内在增长是碳排放量增多的主要影响因素，研究总体呈现出理论分析阶段，缺乏对我国碳排放系统性的研究[2]。伴随着国家政策的导向作用，研究碳排放课题不断深入，并形成了大量反映我国碳排放现状与特征的研究成果，这为我国碳减排政策的出台提供了一定的帮助。目前相关的研究主要聚焦在三个方面：一是碳排放测算与影响因素分析，诸多学者在研究的过程中逐渐完成了对我国碳排放的测算，并分析出碳排放的主要影响因素[3]。田原等人运用改进的 STIRPAT 模型以及两阶段系统广义矩估计理论研究碳排放因素，通过实证检验出中国资源型产业低碳转型的主要影响因素，并给出具体的政策建议[4]。二是研究以全国省域的碳达峰研究为主，区域性省域碳达峰研究较少，在考虑碳排放权的过程中更多的以省域为研究对象，众多学者们考虑到将碳排放权定量地分配到各省域，基于各省域原始排放量以及经济结构差异性，研究出我国碳排放量效率省域上呈现出东高西低的趋势，从而测算出各省域之间的碳减排权的比重以及减排潜力[5] [6] [7] [8]。三是研究碳排放权某个行业分配指标逐渐增多，在研究碳排放权在行业中的分配逐渐从定性到定量发展，定量方法主要集中在指标法、DEA 法、博弈论法以及综合法，且在研究过程中更多地考虑到单个行业之间碳排放权分配问题，根据不同行业之间的特点从而展开研究[9] [10] [11] [12]。

综上分析，目前研究中国碳排放权文献呈现指数式暴涨，所得的结果也逐渐完善了我国碳排放权的分配问题，但也存在一定的不足。一是目前研究碳排放权分配的课题大部分集中在以不同省域为视角进行分析，将我国碳减排任务分配到各省域，忽略了以行业为代表的减排潜力，特别是作为我国经济支柱的不同行业在碳排放权分配过程如何精准减排是不可忽视。二是在研究各行业碳减排权分配的过程中研究过于聚焦某个单一行业，缺乏对全局行业的分配研究分析，在研究行业碳减排权过程中各行业之间的异质性不能较好的体现出来。

基于此，本文首先考虑到不同行业碳减排的相关影响程度，分析出以农林牧渔水利业、工业、建筑业、交通邮电业、批发零售餐饮业、日常生活消费业以及其他行业为具体行业来研究对我国碳排放的影响程度，利用灰色关联分析方法分析出不同行业与我国碳排放量的关联度；其次，根据分析结果运用 GM(1,1) 模型对我国各行业碳排放量分别进行预测；最后，重新构建各行业之间的碳排放权分配指标体系，以公平性、效率性、潜力性以及关联性来确定行业分配标准，借助熵值法来确定各指标的权重值，从而倒逼出分配到各行业的碳排放权值，并与预测出 2030 年时各行业的碳排放量进行对比，分析出各行业的碳排放权初始空间余额值，提出相应行业不同的减排政策，争取早日实现我国碳达峰以及碳中和的目标。

3. 我国各行业碳减排影响程度实证分析

3.1. 变量选取与数据来源

选取农林牧渔水利业、工业、建筑业、交通运输仓储和通信邮电业、批发零售餐饮业、日常生活消费业以及其他行业(金融业和房地产业等)为影响因素来研究与我国碳排放总量的关联度。其中，农林牧渔水利业(x_1)是指在农业、林业以及水利业等过程中利用煤油等能源种类产生的二氧化碳排放量；工业(x_2)

是指采掘业、制造业以及电力煤气等在运行过程中产生的二氧化碳排放量；建筑业(x_3)是指工人在建筑工地上使用物料过程中二氧化碳排放量；交通运输仓储和通信邮政业(x_4)是指在交通运输、通信过程中等产生的二氧化碳排放量；批发零售和住宿餐饮业(x_5)是指用于平常消费购物等过程产生的二氧化碳排放量；日常生活消费业(x_6)是指日常生活过程中的排放量；其他行业(x_7)是指金融、房地产等其他行业的二氧化碳排放量。所用数据均来自历年的《中国能源统计年鉴》以及《中国能源平衡表》中，包括 2010~2019 年各行业汇总的碳排放值，不同行业碳排放数值通过表 1 的能源种类计算而来，因 2020 年全国受疫情的影响碳排放量出现断崖式数据故排除不做研究。

Table 1. Carbon emission values of specific energy types**表 1.** 具体能源种类的碳排放值(单位：万吨)

能源种类	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
碳排放系数	1.90	2.86	3.02	2.95	3.01	3.09	3.17	2.16

3.2. 灰色关联性分析

灰色关联分析方法是目前较为成熟的研究数据内部规律方法，对比统计学中的回归、聚类分析等，灰色关联方法对数据样本的要求较低，很好地避免数据波动，具有较强的鲁棒性，特别是在研究宏观面板数据时，数据是受到多种影响因素作用下显示出来的结果，影响因素很难做定量分析时，灰色关联方法很好地分析出数据的内部规律，以帮助决策进行分析。

首先，将我国从 2010~2019 年的全国碳排放总量(x_0)作为母序列，以 $x_0 = \{x_0(k) | k = 1, 2, \dots, 10\}$ 表示；将农林牧渔水利业(x_1)、工业(x_2)、建筑业(x_3)、交通邮政业(x_4)、零售餐饮业(x_5)、日常生活消费业(x_6)以及其他行业(x_7)作为子序列，以 $x_i = \{x_i(k) | k = 1, 2, \dots, 10\} (i = 1, 2, \dots, 7)$ 表示；将母序列和子序列分别无量纲化处理，本文选择均值法处理得到无量纲化数据得表 2 结果。

Table 2. Results of dimensionless treatment**表 2.** 无量纲化处理结果

年份	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
2010	0.86	0.86	0.87	0.86	0.75	0.85	0.79	0.83
2011	0.95	0.90	0.97	0.91	0.82	0.96	0.84	0.91
2012	0.99	0.93	1.00	0.90	0.90	1.02	0.87	0.97
2013	1.04	1.01	1.05	1.01	0.96	1.08	0.93	1.05
2014	1.03	1.02	1.03	1.03	1.00	1.07	0.98	1.01
2015	1.01	1.06	0.99	1.08	1.05	1.11	1.07	1.13
2016	1.01	1.09	0.99	1.07	1.08	1.10	1.11	1.10
2017	1.02	1.11	1.00	1.08	1.13	1.05	1.16	1.05
2018	1.05	1.03	1.03	1.04	1.16	0.91	1.14	1.00
2019	1.06	0.99	1.06	1.02	1.15	0.86	1.11	0.95

其次，依据母序列与各子序列之间的差值分别求出各子差序列值：

$\varphi_i = \{\varphi_i(k) | k = 1, 2, \dots, 10; i = 1, 2, \dots, 7\}$ ，遍历所有的子差序列值寻找最大差值 M 以及最小差值 m ，在依据

$\omega[x_0(k), x_i(k)] = (m + \rho M) / (\varphi_{0i}(k) + \rho M)$ ，其中 p 为分辨系数取为 0.5，则可以计算出各行业每年的关联系数得表 3。

Table 3. Annual correlation coefficient of various industries
表 3. 各行业每年的关联系数

年份	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
2010	1.00	0.90	1.00	0.50	0.94	0.59	0.79
2011	0.68	0.87	0.73	0.45	0.96	0.49	0.72
2012	0.67	0.90	0.54	0.56	0.77	0.49	0.90
2013	0.80	0.91	0.78	0.58	0.71	0.49	0.88
2014	0.99	0.97	0.95	0.80	0.74	0.71	0.90
2015	0.66	0.91	0.58	0.69	0.50	0.64	0.46
2016	0.56	0.88	0.61	0.60	0.53	0.50	0.54
2017	0.54	0.87	0.66	0.50	0.79	0.44	0.80
2018	0.86	0.91	0.99	0.48	0.43	0.52	0.69
2019	0.59	0.98	0.72	0.57	0.34	0.68	0.49

最后，发现各行业每年的关联系数都在(0, 1]之间，故可以求其每个行业的平均数来代替分析与我国碳排放总量的关联系数，既得到表 4 关联序。

Table 4. Correlation degree and sequence of carbon emission impact degree
表 4. 碳排放影响程度关联度与关联序

子序列	母序列为我国碳排放总量 x_0	
	关联度	关联序
x_1	0.7352	3
x_2	0.911	1
x_3	0.7551	2
x_4	0.5725	6
x_5	0.6704	5
x_6	0.5538	7
x_7	0.717	4

3.3. 关联程度分析

根据上述研究分析，与我国碳排放总量关联系数最高的依次是工业、建筑业、农林牧渔水利业、其他行业、零售餐饮业、交通运输业以及日常生活消费业。并且根据经验可得，当 $p = 0.5$ 时，关联度值大于 0.5 即可表明通过检验，当关联度大于 0.7 时就认为二者存在很强的关联性，关联度大于 0.6 时认为存在较强的关联性，关联度大于 0.5 时认为存在较弱的关联性。既本文研究各行业为代表指标是具有显著性的，故可以为后续碳排放预测以及碳排放权分配研究使用。

4. 基于 GM(1,1)模型对我国碳排放总量及各行业预测

4.1. 模型建立

设定我国从 2010~2019 年的全国碳排放总量作为原始序列 $x^{(0)}$:

$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(10)\}$, 然后对原始序列 $x^{(0)}$ 作一次累加生成新序列值: 既 $x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(10)\}$, 其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=k}^{10} x^{(0)}(i)$ ($k = 1, 2, \dots, 10$)。

(1) 首先, 对原始序列 $x^{(0)}$ 进行检验分析。依据累加序列 $x^{(1)}$ 以及公式: $\sigma(k) = x^{(0)}(k)/x^{(1)}(k-1)$, 可以计算出 $\sigma(k)$ 的值, 如表 5 分析可得: $\sigma(2) > 1$, $\sigma(k) > \sigma(k-1)$, 当 $k \in [2, 10]$ 时满足检验要求, 对原始序列进行 GM(1,1)模型预测。

Table 5. Quasi-smooth ratio

表 5. 准光滑比

$\sigma(2)$	$\sigma(3)$	$\sigma(4)$	$\sigma(5)$	$\sigma(6)$	$\sigma(7)$	$\sigma(8)$	$\sigma(9)$	$\sigma(10)$
1.1059	0.5455	0.3706	0.268	0.207	0.1715	0.1488	0.1325	0.1191

(2) 其次, 原始序列为: $x^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(10)]$, 而通过计算出来的累加序列为: $x^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(10)]$, 根据 GM(1,1)模型得到矩阵方程 $\xi = (B^T B)^{-1} B^T Y$ 转化为 $\xi = [a, u]^T$, 其中 a 为发展系数, u 为控制系数, ξ 为参数向量, 其中 B 和 Y 公式为:

$$B = \begin{bmatrix} -0.5(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -0.5(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -0.5(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

即可得到 GM(1,1)预测模型表达式方程为:

$$\begin{aligned} \hat{X}^{(1)}(k) &= [x^{(0)}(1) - u/a] e^{-\alpha(k-1)} + u/a (k = 1, 2, \dots, n) \\ \hat{X}^{(0)}(k) &= \hat{X}^{(1)}(k) - \hat{X}^{(1)}(k-1) \end{aligned}$$

(3) 最后, 根据公式进行推导可以得到 $a = -0.004788$, $u = 8876.183247$, 因 a 的值远小于 0.3, 故用 GM(1,1)模型预测出来的值较为准确, 最后预测出来的模型表达式为:

$$\hat{X}^{(1)}(k) = 1861613.275 e^{0.004788(k-1)} - 1853708.727 (k = 2, 3, \dots, n) .$$

4.2. 模型检验

(1) 首先利用逐减序列计算出对应的碳排放预测序列 $x^{(01)}(k)$ ($k = 1, 2, \dots, 10$) , 则相对残差值 $\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - x^{(01)}(k)$ ($k = 1, 2, \dots, 10$) , 相对误差 $\pi(k) = \varepsilon(k)/x^{(0)}(k)$, 则可以用平均相对误差来检验模型的精度得表 6, 既 $\bar{\pi} = \sum_{k=14}^n \pi(k)/n \approx 0.025$, 当相对误差值平均小于 3% 时, 则说明该模型精度较高。

(2) 其次进行后验差检验。计算出原始序列标准差 S_1 ($S_1 = \sqrt{\sum [x^{(0)}(k) - \bar{x}^{(0)}]^2 / (n-1)}$) 和平均值 $\bar{x}^{(0)}$

以及绝对误差标准差 S_2 ($S_2 = \sqrt{\sum [\varepsilon^{(0)}(k) - \bar{\varepsilon}^{(0)}]^2 / (n-1)}$) 和平均值 $\bar{\varepsilon}^{(0)}$, 则求出检验值

$C = S_2/S_1 = 217.1318/543.4166 = 0.3996$ 。其中用来 P 表示小误差概率, $\rho = \rho \left\{ \left| \varepsilon^{(0)}(k) - \bar{\varepsilon}^{(0)} \right| < 0.6745S_1 \right\}$ 为另一个重要检验值, 计算出 $\rho = 0.9$ 。后验差检验两个重要检验值分别是 C 和 P , 其中 C 值越小则说明检验精度越高, 本篇检验值 C 为 0.3996 表示检验精度高, 而 P 值越大则说明模型的拟合值分布相对均匀, 可以观察到本篇检验值 P 为 1 表示检验精度很高, 故在进行后验差检验时表示预测出来的检验精度都是很高的。

Table 6. Comparison between actual emissions and forecast**表 6.** 实际排放量与预测的对比(排放量单位/百万吨)

年份	全国排放量	预测结果	相对残差	相对误差
2010	7904.5475	7904.5475	0.0000	0.0000
2011	8741.5621	8935.4087	-193.8466	-0.0222
2012	9080.5484	8978.2970	102.2513	0.0113
2013	9534.2351	9021.3913	512.8439	0.0538
2014	9451.2816	9064.6923	386.5893	0.0409
2015	9253.5028	9108.2012	145.3016	0.0157
2016	9256.2511	9151.9189	104.3321	0.0113
2017	9408.1708	9195.8465	212.3243	0.0226
2018	9621.1199	9239.9849	381.1350	0.0396
2019	9794.7564	9284.3352	510.4212	0.0521

(3) 最后, 利用绝对关联度检验实际序列 $x^{(0)}$ ($x^{(0)}(k) = (x^{(0)}(1), \dots, x^{(0)}(n))$) 以及预测序列 $\hat{x}^{(01)}$ ($\hat{x}^{(01)}(k) = (\hat{x}^{(01)}(1), \hat{x}^{(01)}(2), \dots, \hat{x}^{(01)}(n))$) 的关联度。用 $\eta(k)$ 表示预测序列和原始序列两者的关联系数, 公式为:

$$\eta(k) = \frac{\min \min |\hat{x}^{(01)}(k) - X^{(0)}(k)| + \rho \max \max |\hat{x}^{(01)}(k) - X^{(0)}(k)|}{|\hat{x}^{(01)}(k) - X^{(0)}(k)| + \rho \max \max |\hat{x}^{(01)}(k) - X^{(0)}(k)|}$$

其中: $|\hat{x}^{(01)}(k) - X^{(0)}(k)|$ 表示同一年的第 $x^{(0)}$ 和 $\hat{x}^{(01)}$ 之间的绝对误差值, $\min \min |\hat{x}^{(01)}(k) - X^{(0)}(k)|$ 表示二者之间最小差值, $\max \max |\hat{x}^{(01)}(k) - X^{(0)}(k)|$ 表示二者之间最大差值, P 为分辨率一般取为 0.5, 故计算出预测序列和原始序列的关联度为 $\eta = 0.892$, 通过关联性检测值可以判断拟合正确。

4.3. 模型预测

综上发现, 在运用 GM(1,1) 模型预测时其检验值都是较高的, 特别是平均相对误差差值以及后验差检验时都检测出较高的精度, 表明用 GM(1,1) 模型进行预测是正确的, 故可以按照模型预测出未来十年我国碳排放总量。其中, 我国的碳排放总量从 2010~2019 年的平均增长率约为 2.47%, 而根据 GM(1,1) 模型预测出未来将会以 0.48% 的增长速率排放二氧化碳, 增长速率虽大幅度放缓, 但到 2030 年时我国的碳排放量将会达到 9786.46495 百万吨, 且还有进一步增长的趋势, 而根据我国各专家预测出来的各行业汇总达峰碳排放量约在 95 亿吨到 100 亿吨[13] [14]。并分析二者预测出来的差异主要体现在今后的政策控制上的不同, 未来将会出现一系列碳排放政策进行减少碳排放, 故二者存在一定的差距, 同时这也说明我国需要进行政策措施进行产业结构的调整, 优化各行业的碳减排情况, 根据全国预测模型在分别预测出各行业的碳排放量, 预测数值如表 7 所示。

Table 7. Total carbon emissions in China and predicted values of various industries
表 7. 我国碳排放总量及各行业预测值(排放量单位/百万吨)

年份	全国排放量	农牧渔业	工业	建筑业	交通邮政	批发零售	生活消费	其他行业
2020	9328.8983	93.3731	7909.6392	43.6755	648.7357	80.1061	386.3428	163.4267
2021	9373.6753	94.0522	7932.3304	44.0450	661.6465	79.6509	394.0562	163.8570
2022	9418.6673	94.7362	7955.0867	44.4176	674.8142	79.1983	401.9237	164.2883
2023	9463.8752	95.4252	7977.9082	44.7933	688.2439	78.7482	409.9482	164.7208
2024	9509.3001	96.1192	8000.7952	45.1723	701.9409	78.3007	418.1329	165.1545
2025	9554.9430	96.8183	8023.7479	45.5544	715.9105	77.8558	426.4811	165.5892
2026	9600.8050	97.5224	8046.7664	45.9398	730.1581	77.4133	434.9959	166.0252
2027	9646.8872	98.2317	8069.8510	46.3284	744.6893	76.9734	443.6807	166.4622
2028	9693.1905	98.9461	8093.0018	46.7203	759.5096	76.5360	452.5389	166.9004
2029	9739.7161	99.6657	8116.2190	47.1156	774.6249	76.1011	461.5740	167.3398
2030	9786.4649	100.3906	8139.5028	47.5142	790.0411	75.6686	470.7894	167.7803

5. 基于熵值法对我国各行业碳排放权分配研究

5.1. 行业碳排放权指标体系选取

在现有的研究成果中, 目前研究省域碳排放权者众多, 在构建省域碳排放权分配指标的过程中大部分学者以公平性和效率性原则为准, 前者主要着眼于国内行业生产总值(GDP)以及从业人数等因素, 追求一种公平合理的分配方案, 而后者主要侧重于碳生产力等, 即以较少的碳排放量产生较大的产出量, 使得分配过程中避免出现过度强调公平性原则。于是, 本文在研究的过程也考虑到这方面, 将二者指标纳入到行业碳排放权指标体系中, 但考虑到行业之间的碳排放权与省域的碳排放权分配不同, 故需要在指标体系上作出创新, 从社会、经济、行业未来发展趋势三重维度系统选取分配指标, 具体的指标构成如表 8。

Table 8. Index system of carbon emission rights of industrie
表 8. 行业碳排放权指标体系

综合指标	指标量化	指标量度	作用方向
公平性	各行业人均生产总值	GDP 值/行业人数	+
效率性	碳排放力	GDP 值/碳排放量	+
潜力性	绿色专利	绿色专利有效量	+
相关性	相关排序	灰色关联性	-

其中, 在各行业碳排放权指标体系中, 公平性指标主要是指各行业的人均 GDP 数值, 既对应着该行业人均 GDP 数值越高, 则所分配的碳排放权份额就越多, 表现为正向指标。效率性指标主要是碳排放力, 即期望以较少的投入获取较多的产出, 表现出正向作用。而本文所研究的对象为各行业碳排放权问题, 在以往研究的过程中多用数据包络分析(DEA)以及博弈论等, 但这些研究并不能很好地解决各行业之间异质性问题, 故本文增添潜力性和相关性指标。潜力性指标主要考虑到各行业之间的异质性问题以及能

否承受更多碳排放权的问题,选择各行业之间绿色专利有效量为指标,可以解决各行业异质性问题以及未来各行业承担减排潜力问题,既该行业绿色专利有效量越多,未来减排的潜力就越高,从而获得的碳排放权就越多,呈现出正向关系。而相关性指标主要考虑到各行业碳排放量与我国碳排放总量之间的关系,深入分析出各行业与总碳排放量之间的因素变化趋势的一致性及相似相异同步变化程度,既关联性越强承担的分配配额就越多,从数值上呈现出负向关系。

5.2. 基于熵值法确定各行业碳排放权配额权重

熵值法是通过细化各种指标传递出来的信息从而确定各指标的权重,比常规性方法,例如德尔菲法等过度依靠人的主观性,熵值法能够客观地显示出各指标的效用价值,从而更具有科学性,而本文也将采用该方法计算出各行业的碳排放权分配份额权重,研究数据均来自中国统计年鉴、中国国家专利局以及中国能源统计年鉴,具体如下步骤:

首先,分析出各行业的作用方向,判断出各指标的正负方向,从而进行无量纲化处理,既为正方向则为 $Y_{ij} = \frac{X_{ij} - m_j}{M_j - m_j}$,为负方向则为 $Y_{ij} = \frac{M_j - X_{ij}}{M_j - m_j}$,其 M_j 为 X_{ij} 最大值, m_j 为 X_{ij} 最小值,故可以得到无量纲化后的 Y_{ij} 值见表9。

Table 9. Indicators reflect vector normalization results

表 9. 指标体现向量归一化结果

指标	农牧渔业	工业	建筑业	交通邮政	批发零售	生活消费	其他行业
公平性	0.1995	1.0001	0.1557	0.0792	0.2345	0.0001	0.9651
效率性	0.0064	1.0001	0.0001	0.0769	0.0047	0.0438	0.0152
潜力性	0.0379	1.0001	0.0187	0.2186	0.0001	0.2359	0.0275
相关性	0.6668	1.0001	0.8334	0.1668	0.3334	0.0001	0.5001

其次,在进行计算出各行业之间的特征比重或贡献率 p_{ij} ,然后在计算出第 j 个指标的信息熵值 e_j ,并计算出第 j 个指标的差异性系数 g_j ,从而确定出各行业的指标权重值 w_j ,具体的公式如下:

$$P_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}}, \quad e_j = \frac{\sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}}{-\ln n}, \quad g_j = 1 - e_j, \quad w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j}$$

最后,通过借助上述的数据以及公式可以计算出各行业指标体系的权重值,具体的权重值如表10。

Table 10. Weights of carbon emission rights indicators of various industries

表 10. 各行业碳排放权指标权重值

综合指标	公平性	效率性	潜力性	相关性
指标权重值	0.1696	0.4544	0.2847	0.0912

5.3. 各行业碳排放权分配及初始空间余额

借助上述的研究成果可知我国在2030年时碳排放量将会在9786.46495百万吨,则在结合各行业碳排放权指标体系的权重值,可以得到各行业的碳排放权分配额度值,在分别与各行业预测出的2030年时

碳排放量进行对比分析, 配额值与各行业预测出的碳排放差值为碳排放权初始空间余额, 正值为盈余, 负值为欠缺, 具体计算数值如表 11。

Table 11. Allocated quota value and initial space balance of carbon emission rights in various industries
表 11. 各行业碳排放权分配配额值及初始空间余额

各行业分析表	碳排放权分配额			各行业预测碳排放值			碳排放权初始空间余额		
	数量/百万吨	占比/%	排名	数量/百万吨	占比/%	排名	数量/百万吨	排名	类型
农林牧渔业	614.5689	6.2798	4	100.3906	1.0253	5	514.1784	3	中度盈余
工业	5671.7606	57.9552	1	8139.5028	83.1267	1	-2467.7422	7	重度欠缺
建筑业	611.3703	6.2471	5	47.5142	0.4853	7	563.8562	2	中度盈余
交通邮政业	713.7221	7.293	3	790.0411	8.0685	2	-76.319	6	轻度欠缺
零售餐饮业	410.3299	4.1928	7	75.6686	0.7728	6	334.6613	4	中度盈余
日常消费业	493.9862	5.0476	6	470.7894	4.8081	3	23.1968	5	轻度盈余
其他行业	1270.7269	12.9845	2	167.7803	1.7135	4	1102.9466	1	重度盈余

6. 结论与建议

6.1. 研究结论

(1) 本文研究各行业碳排放量与全国碳排放量呈现紧密关联性, 关联程度依次为工业、建筑业、农林牧渔业等, 且关联度均大于 0.5, 即研究对象具有一定的显著性。并预测出我国 2030 年时碳排放量将达到 9786.46 百万吨, 且还具有 0.48% 的速率持续增长, 又重新构建行业之间的碳排放分配指标, 其效率性、潜力性指标权重为 0.4544、0.2847, 占比达 73.91%, 显示出在分析各行业碳排放权分配的过程中需要考虑到碳排放力以及各行业之间的潜力性才能体现出各行业之间的异质性, 从而分析各行业之间的碳排放权分配, 继而制订精准行业政策来促进各行业实现碳达峰目标。

(2) 我国各行业碳排放权分配额差异明显。工业和其他行业(金融行业、房地产行业等)碳排放权分配总占比达 70.94%, 与此对应, 零售餐饮行业配额最少, 占比 4.19%, 交通邮政业、农林牧渔业、建筑业、日常消费业次之。而各行业碳排放额与各行业预测值排名呈现出差异, 主要是各行业未来发展趋势不同, 故未来减排工作重点行业将是工业以及金融行业、房地产行业为代表的其他行业。

(3) 各行业的碳排放权初始空间余额表现出明显的差异性。其工业、交通邮政业表现欠缺状态, 工业属于重度欠缺行业, 其碳排放量与分配额差值最大, 即未来我国碳减排任务应该着重投向工业视角, 不断细化工业减排流程, 使得工业行业早日实现碳达峰。其他行业、建筑业、农林牧渔业、零售餐饮业以及日常生活业都表现出盈余状态, 其中其他行业、建筑业以及农林牧渔业属于重度及中度盈余行业, 即“低排放、高配额”行业, 主要是自身能耗水平较低, 或者该行业能源结构相对简单, 从而客观上造成该行业碳排放量处于较低水平, 从各行业碳配额分配还可以呈现出各行业之间异质性以及我国产业结构调整的一致性。

6.2. 研究建议

与现研究相比[15], 本文在研究过程中进一步拓展, 从研究对象不在聚焦到微观某一行业中, 而是从宏观视角分析我国各行业碳减排任务, 再到研究指标重新分配, 不仅涉及社会经济因素, 还考虑到未来

减排潜力，切实考虑到各行业之间的异质性问题以及未来实现减排能力问题，为生态环境部制定具体行业政策时提供理论支持。研究发现，我国各行业碳排放权分配差异明显，需要制定相应的顶层设计针对各行业精准减排制定措施：(1) 制订风险补偿政策，建立绿色信贷长效地产机制；(2) 积极推进技术进步，采用节能环保材料；(3) 推动产业升级改造，加大对第一产业保护；(4) 优化顶层设计，推行清洁审核制度；(5) 合理疏导消费，提倡低碳消费；(6) 提倡低碳出行，深入优化交通网络；(7) 加大科技投入，打造绿色工业结构。

基金项目

2022 年度广西文科中心“科学建筑工程”专项项目(编号：WKZX2022001)；四川省社会科学重点研究基地系统科学与企业发展研究中心重点项目(编号：XQ22B09)。

参考文献

- [1] 廖志高, 刘攀. 中国碳达峰研究综述及其启示[J]. 广西职业技术学院学报, 2021, 14(6): 1-9.
- [2] 陈邦丽, 徐美萍. 中国碳排放影响因素分析——基于面板数据 STIRPAT-Alasso 模型实证研究[J]. 生态经济, 2018, 34(1): 20-24+48.
- [3] 胡振, 王玥, 何晶晶, 等. 西部城镇家庭能源消费及其碳排放的区域特征研究——基于中国家庭追踪调查的调研数据[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(4): 1-8.
- [4] 田原, 孙慧, 李建军. 中国资源型产业低碳转型影响因素实证研究——基于 STIRPAT 模型的动态面板数据检验[J]. 生态经济, 2018, 34(8): 14-18+30.
- [5] 姜国刚, 左鹏, 陈思文, 李利亭. 中国地区经济增长对碳排放量的非线性影响研究[J]. 生态经济, 2021, 37(12): 13-22.
- [6] 原嫄, 周洁. 中国省域尺度下产业结构多维度特征及演化对碳排放的影响[J]. 自然资源学报, 2021, 36(12): 3186-3202.
- [7] 刘红光, 张子孟, 郭杰. 中国区域间价值链中隐含的碳排放转移研究[J]. 管理评论, 2021, 33(9): 58-64.
- [8] 田云, 林子娟. 巴黎协定下中国碳排放权省域分配及减排潜力评估研究[J]. 自然资源学报, 2021, 36(4): 921-933.
- [9] 田云, 陈池波. 基于碳排放权分配的中国省域碳减排奖惩方案[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 54-62.
- [10] 方恺, 李帅, 叶瑞克, 张琦峰, 龙吟. 全球气候治理新进展——区域碳排放权分配研究综述[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 10-23.
- [11] 马天祥. 考虑各省经济人效应的我国省域碳排放权 DEA 分配[J]. 中外能源, 2019, 24(3): 7-14.
- [12] 刘贞, 白璐, 孙振清, 徐德会, 沙道凤. 竞争市场中碳排放权的分配及其仿真研究——基于企业主体行为的博弈分析[J]. 生态经济, 2019, 35(8): 35-39+74.
- [13] 王珂珂, 牛东晓, 甄皓, 等. 基于 WOA-ELM 模型的中国碳排放预测研究[J]. 生态经济, 2020, 36(8): 20-27.
- [14] 方琦, 钱立华, 鲁政委. 我国实现碳达峰与碳中和的碳排放量测算[J]. 环境保护, 2021, 49(16): 49-54.
- [15] 方恺, 张琦峰, 叶瑞克, 等. 巴黎协定生效下的中国省际碳排放权分配研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1224-1234.